

Technical Paper

Analisis CFD Aliran Udara Panas pada Pengering Tipe Rak dengan Sumber Energi Gas Buang

Distibtuion Analysis Hot Air Flow of Rack Type Dryer With Energy Source From Exhaust Gas Using Computational Fluid Dynamics (CFD)

Hablinur Al-Kindi, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Email: angintimur88@gmail.com

Y Aris Purwanto, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Email: arispurwanto@gmail.com

Dyah Wulandani, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Email: dyahwulandani@yahoo.com

Abstract

Hot air from residual biomass combustion in biomass power plant can be used for drying process. The objective of this study was to analyze the distribution of hot air inside tray dryer using Computational Fluid Dynamic (CFD) and to modify the dryer room for copra drying based on the result of CFD analysis. Result of CFD analysis shows that the distribution of hot air inside dryer room was not homogen among trays. The average temperature at top tray (I) was $90.0 \pm 10.8^\circ\text{C}$ and bottom tray (IV) was below 49°C . Modification of dryer room was carried out by adding partition wall in the end of tray to allow the hot air flow through all trays. After modification, the temperature of drying air inside dryer room increased and the temperature distribution was better than that before modification. From CFD simulation it was resulted the temperature of drying air at tray I, II, III and IV were 114°C , 124°C , 135°C and 119°C respectively. Further modification was carried out to obtain the drying temperature of $75\text{-}90^\circ\text{C}$. This drying temperature was achieved by decreasing the frequency electricity for suction fan from 50 to 25 Hz, 20 Hz and 15 Hz. From CFD simulation was indicated that in order to obtain the temperature inside dryer room of $75\text{-}90^\circ\text{C}$, the frequency of electricity should be decreased to 206.9°C (20 Hz) to 230.7°C (25 Hz).

Keywords : gas from residual biomass combustion, CFD, temperature distribution, tray dryer.

Abstrak

Udara panas sisa pembakaran biomassa pada alat pembangkit listrik tenaga biomassa dapat dimanfaatkan untuk proses pengeringan. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis sebaran suhu pada ruang pengering dari alat pengering tipe rak yang memanfaatkan udara panas sisa pembakaran biomassa menggunakan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dan melakukan modifikasi ruang pengering berdasarkan hasil simulasi CFD yang sesuai untuk pengeringan kopra. Hasil analisis CFD untuk sebaran panas di ruang pengering menunjukkan ketidakrataan sebaran udara panas antar rak pengering. Suhu rata-rata pengukuran rak paling atas (I) $90.0 \pm 10.8^\circ\text{C}$, sedangkan rak IV (bawah) 49°C . Modifikasi ruang pengering dilakukan dengan menambahkan dinding pembagi untuk mengarahkan udara pengering yang diletakkan di ujung rak I, II, dan III. Setelah penambahan dinding, udara panas lebih merata dan terjadi kenaikan suhu yang disebabkan karena panas gas buang yang besar yaitu sekitar 294.5°C . Suhu rata-rata simulasi CFD setiap rak I, II, III dan IV masing masing 114°C , 124°C , 135°C dan 119°C . Modifikasi selanjutnya dilakukan untuk mendapatkan suhu pengeringan antara $75\text{-}90^\circ\text{C}$ yang sesuai untuk pengeringan kopra dengan menurunkan frekuensi kipas hisap dari 50 Hz menjadi 25 Hz, 20 Hz, dan 15 Hz. Penurunan frekuensi kipas hisap menyebabkan penurunan suhu dalam ruang pengering. Dari hasil simulasi CFD menunjukkan bahwa untuk mendapatkan suhu dalam ruang pengering $75\text{-}90^\circ\text{C}$, maka suhu gas buang diturunkan menjadi 206.9°C (20 Hz) hingga 230.7°C (25 Hz).

Kata kunci: gas sisa pembakaran biomassa, CFD, distribusi suhu, pengering tipe rak

Diterima: 22 Oktober 2014; Disetujui: 15 Januari 2015

Pendahuluan

Pengeringan merupakan salah satu proses pasca panen yang umum dilakukan pada berbagai produk pertanian yang bertujuan untuk menurunkan kadar air bahan sampai tingkat yang aman untuk penyimpanan atau digunakan pada proses lainnya. Proses pengeringan produk pertanian yang banyak dilakukan oleh petani Indonesia adalah dengan cara penjemuran. Cara ini memiliki banyak kelemahan, selain dibutuhkan lahan yang luas, juga terjadi kontaminasi produk oleh debu, kotoran dan polusi, dan ketergantungan terhadap kondisi iklim (Sayful dan Hargono 2009). Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan, Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi (P3TKEBTKE) LEMIGAS, telah membuat model pengeringan tipe rak yang memanfaatkan panas dari biomassa. Model pengeringan ini dapat mengeringkan bahan pertanian tanpa harus bergantung pada panas matahari, ramah lingkungan, tidak memerlukan banyak tempat, dan terhindar dari debu dan kotoran.

Pengering terkogenerasi dengan sistem pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Panas gas buang dari pembakaran biomassa di dalam boiler digunakan untuk pengeringan. Komoditi perkebunan yang dipilih untuk pengeringan adalah kopra. Suhu pengeringan ideal untuk kopra adalah 90°C (Guarteet *et al.* 1996). Suhu pengeringan kopra bisa dilakukan lebih rendah lagi yaitu 65-85°C. (Niamnuy dan Devahastin 2005). Pada kopra, pengeringan bertujuan menurunkan kadar air putih lembaga dari kadar air 50-55% menjadi 7% (Mohanraj dan Chandrasekar 2008).

Pengering tipe rak banyak digunakan untuk pengeringan karena disain yang simpel dan mempunyai daya tampung yang besar. Kelemahan terbesar dari pengering tipe rak adalah tidak meratanya sebaran suhu pada ruang pengering (Misha *et al.* 2013). Bentuk geometri dari ruang pengering mempengaruhi kualitas dan kesegeraman bahan yang dikeringkan (Tzempelikos *et al.* 2012). Pola aliran udara dalam pengering perlu diketahui dengan melakukan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Salah satu keunggulan analisis CFD antara lain, memberikan pemahaman

rinci tentang distribusi aliran pindah panas dan massa, dan memungkinkan untuk mengevaluasi perubahan geometrik (Xia dan Sun 2002). Simulasi CFD untuk pengeringan telah banyak dilakukan seperti Mirade dan Daudin (2002) mempelajari medan kecepatan pada pengering sosis modern untuk memberikan informasi tentang sirkulasi udara dalam ruang pengering dan Mathioulakis *et al.* (1998) menggunakan CFD untuk mengetahui pergerakan udara dalam pengering buah. Puji Widodo (2009) menggunakan CFD untuk pengering tipe rak berputar.

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis sebaran suhu pada ruang pengering dan besarnya suhu setiap rak dengan menggunakan analisis CFD. Hasil simulasi CFD digunakan untuk memodifikasi ruang pengering. Diharapkan setelah modifikasi, sebaran suhu di dalam ruang pengering relatif merata dan suhu udara setiap rak berkisar 75-90°C.

Bahan dan Metode

Waktu dan Tempat

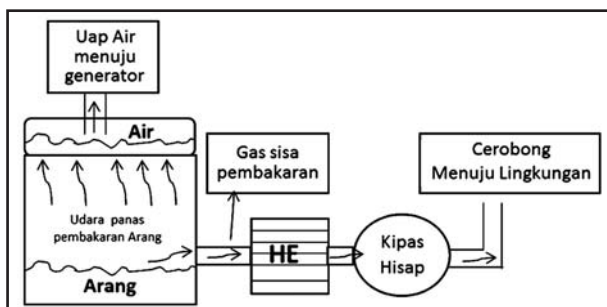
Waktu penelitian dimulai dari bulan April 2013 hingga Juli 2014 bertempat di Laboratorium Boiler. Lemigas Jakarta

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan antara lain perangkat lunak *Solidworks*, ruang pengering, termometer, termokopel, RH meter, anemometer, *Logger* (HIOKI LR8500), dan inverter. *Solid Works* merupakan perangkat lunak *Computer Aided Design* yang mempunyai analisis CFD. Bahan yang digunakan adalah arang dari batok kelapa yang diletakan di dalam boiler.

Ruang pengering terbuat dari bahan *stainless steel* di bagian dalam dan seng bagian luar. Terdapat insulator berupa rockwool di bagian tengahnya. Terdapat 4 rak dimana jarak antar rak 12 cm dengan ketebalan 5 mm. Dimensi ruang pengering 75 cm x 50 cm x 55.5 cm. Kecepatan kipas hisap dan kipas hembus adalah 2800 rpm dan 1400 rpm. *Heat exchanger* (HE) yang digunakan bertipe cross flow. *Heat exchanger* dirakit oleh bengkel. Dimensi HE 30.4 cm x 30.4 cm x 30.4 cm dan terdapat 97 pipa yang terbuat dari tembaga dengan panjang pipa 30,4 cm dan ukuran diameter dalam dan diameter luar masing-masing 15.88 cm dan 13.88 cm. Gambar 1 menunjukkan model kogenerasi PLTU dan pengeringan dan Gambar 2 menunjukkan model pembangkit listrik dan model pengeringan kopra.

Udara panas hasil pembakaran biomassa arang digunakan untuk memanaskan air menjadi uap panas untuk menggerakkan generator. Udara panas tersebut tidak dibuang melainkan dimanfaatkan untuk pengeringan. Dalam model pengeringan



Gambar 1. Model kogenerasi PLTU dan sistem pengeringan.

tersebut terdapat boiler, *heat exchanger* (HE), kipas hisap, kipas hembus, dan ruang pengering. Udara panas hasil pembakaran biomassa arang dari boiler (A) masuk kedalam *heat exchanger* (B) akibat hisapan dari kipas hisap (C). Kipas hembus (D) menghembuskan udara lingkungan ke *heat exchanger* dan masuk ke dalam ruang pengering (E). Sehingga udara yang masuk ke dalam ruang pengering merupakan udara bersih.

Simulasi CFD

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan program komputer perangkat lunak untuk memprediksi dan menganalisis secara kuantitatif aliran fluida, perpindahan panas, transpor fenomena dan reaksi kimia. CFD merupakan analisis numerik dengan kontrol volume sebagai elemen dari integrasi persamaan-persamaan, yang terdiri dari persamaan keseimbangan massa, momentum dan energi (Versteeg and Malalasekera, 1995).

Hukum kesetimbangan massa sebagai berikut :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Persamaan momentum 3 dimensi :

Momentum arah x:

$$\rho \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + S_{Mx} \quad (2)$$

Momentum arah y :

$$\rho \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] = \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + S_{My} \quad (3)$$

Momentum arah z :

$$\rho \left[u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + S_{Mz} \quad (4)$$

Persamaan energi :

$$\rho \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \rho \left[\frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] + k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + S_i \quad (5)$$

Pada prinsipnya, ada tiga langkah yang harus dilakukan untuk menggunakan CFD, yaitu sebelum proses, saat proses, dan setelah proses (Shaw, 1992).

Langkah sebelum proses antara lain *thinking*, *meshing*, dan pembuatan model komputasi atau model perhitungan. Pada tahap *thinking*, analisis memperhitungkan masalah aliran fluida dan menganalisis tentang masalah tersebut. Tahap *meshing* menciptakan bentuk domain masalah yang akan di analisis. Hal ini biasanya dilakukan dengan program *computer aided design* (CAD). Tahap pembuatan model antara lain: membuat batas-batas domain masalah, menentukan kondisi awal (input nilai), pengaturan sifat fisik fluida dan pengaturan parameter kontrol numerik.

Pada langkah proses memerlukan komputer untuk memecahkan ribuan persamaan. Proses ini membutuhkan waktu yang lama tergantung banyaknya *mesh* yang dibuat.

Tahap setelah proses adalah tahap dimana mengevaluasi data yang dihasilkan CFD. Model yang telah diselesaikan oleh CFD dapat dianalisis dengan numerik dan grafis. CFD dapat membuat visualisasi dari yang sederhana grafik 2-D hingga gambar 3-D.

Data kondisi awal dibagi menjadi dua, yaitu data yang didapat dari pengukuran langsung dan data dari perhitungan matematika. Data pengukuran pengukuran langsung antara lain: suhu keluar boiler (294.5°C), suhu awal (30°C), debit udara masuk ke HE (0.32 m³/s), kecepatan kipas hembus (2.2 m/s), material bahan (tembaga untuk HE dan *stainless steel* untuk ruang pengering), model aliran (laminer), dan suhu lingkungan (30°C). Data-data tersebut dimasukkan ke dalam data input *flow simulation*.

Sedangkan data input dari perhitungan matematika adalah koefisien pindah panas pada HE sebesar 24.36 W/m² °C. Persamaan untuk mencari koefisien pindah panas di dapat dengan:

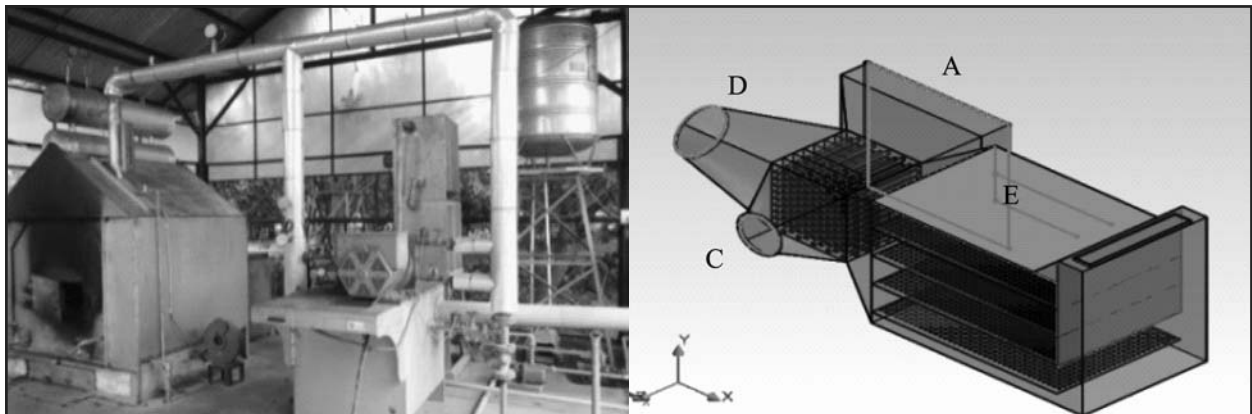
$$U = \frac{1}{Rt} \quad (1)$$

Dimana:

U = Koefisien pindah panas (W/m² .K)

Rt = Tahanan termal keseluruhan (m² .K/W)

Tahanan termal keseluruhan dapat diperoleh sebagai berikut:



Gambar 2. Model pembangkit listrik tenaga uap (kiri) dan model pengering (kanan)

$$R_t = R_i + R_{F_1} + R_k + R_{F_2} + R_o \quad (2)$$

Dimana:

R_i = Tahanan termal akibat konveksi udara

R_{F_1} = Tahanan termal akibat faktor pengotor udara ($0.00035 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$)

R_k = Tahanan termal akibat konduktivitas bahan

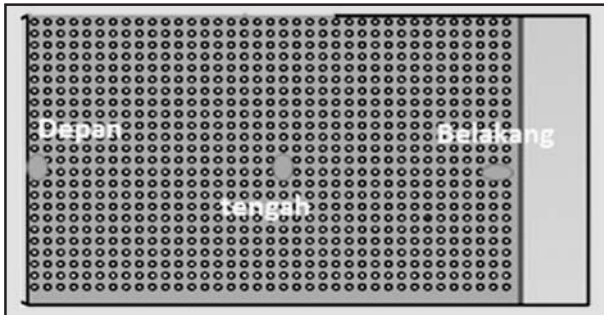
R_{F_2} = Tahanan termal akibat faktor pengotor gas buang ($0.00176 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$)

R_o = Tahanan termal akibat konveksi gas buang

Setelah simulasi CFD selesai, data hasil simulasi (arah sebaran suhu, suhu fluida, dan kecepatan fluida) dianalisis sehingga dapat dilakukan modifikasi (bila diperlukan). Bila hasil modifikasi telah baik untuk pengeringan kopra, maka dilakukan proses validasi. Jika belum, maka harus dilakukan modifikasi lagi. Validasi dilakukan dengan membandingkan data dari pengukuran langsung dan data dari simulasi CFD. Bila koefisien determinasi (R^2) mendekati 1 maka simulasi CFD sudah mendekati hasil sebenarnya. Asumsi aliran udara dalam keadaan *steady*.

Pengukuran Langsung

Penelitian ini tidak memasukkan kopra ke dalam ruang pengering saat pengukuran langsung. Data yang diukur adalah suhu fluida di 10 titik dalam ruang pengering. Terdapat 10 termokopel yang tersambung dengan *logger* yang akan mencatat



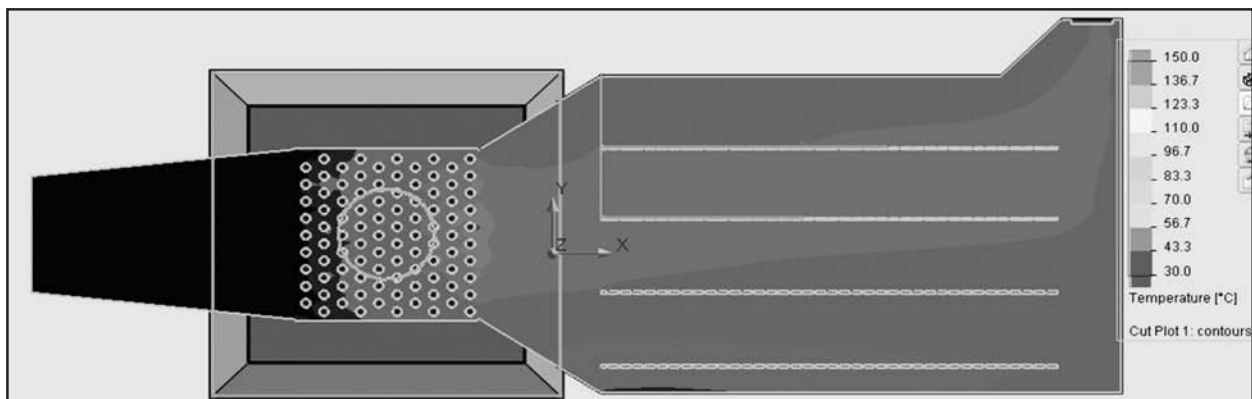
Gambar 2. Posisi termokopel di rak I dan III

suhu pada 10 titik di ruang pengering. Sepuluh titik tersebut antara lain tiga di rak I (depan, tengah, dan belakang), dua di rak II (depan dan belakang), tiga di rak III (depan, tengah, dan belakang), dan dua di rak IV (depan dan belakang). Gambar 2 menunjukkan titik termokopel di rak I dan III. Pada percobaan pertama, termokopel diletakkan ditengah rak dan pada percobaan kedua termokopel digeser ke pinggir rak. Percobaan dilakukan dua kali dengan menggeser posisi termokopel. Percobaan dilakukan selama 30 menit dengan bahan bakar arang sebanyak 15 kg.

Hasil dan Pembahasan

Udara panas masuk ke dalam ruang hanya pada satu sisi. Udara bergerak menuju outlet akibat dorongan dari kipas hembus. Posisi outlet berada pada bagian atas sisi lainnya. Pada penelitian pendahuluan, sebaran suhu rata-rata pada setiap rak (dimulai dari rak paling atas) sekitar 90°C , 60°C , 49°C , dan 41°C . Dari data ini dapat disimpulkan bahwa disain ruang pengering kurang baik untuk mengeringkan kopra dikarenakan sebaran suhu tidak merata. Oleh karena itu, ruang pengering perlu dimodifikasi. Dengan simulasi CFD, sebaran suhu dan arah aliran udara pada ruang pengering dapat diketahui. Gambar 3 menunjukkan sebaran suhu pada ruang pengering sebelum modifikasi hasil simulasi CFD, dengan debit aliran udara $0,31 \text{ m}^3/\text{s}$ dan suhu keluar boiler $270\text{-}320^\circ\text{C}$.

Dari hasil simulasi CFD terlihat perbedaan suhu yang signifikan antara rak I dan rak IV. Perbedaan suhu rata-rata rak I (rak paling atas) dan IV (rak paling bawah) berbeda sekitar 50°C . Sehingga diperlukan modifikasi dalam ruang pengering agar terjadi pemerataan suhu. Bentuk modifikasi adalah penambahan penghalang yang tertempel pada ujung rak I, II, dan III. Penambahan penghalang bertujuan agar terjadi penghambatan aliran udara panas, sehingga diharapkan udara panas akan terjebak lama dalam ruang pengering. Diharapkan nantinya, setelah penambahan penghalang suhu pada rak I akan menyebar ke rak II, III, dan IV.



Gambar 3. Sebaran Suhu pada ruang pengering sebelum modifikasi.

Gambar 4 menunjukkan perbedaan dalam ruang pengering sebelum dan sesudah modifikasi. Penghalang terbuat dari bahan *stainless steel*.

Setelah desain bangunan di ruang pengering diubah, simulasi pengeringan dilakukan lagi. Gambar 5 menunjukkan hasil simulasi setelah modifikasi.

Dari hasil simulasi CFD, sebaran suhu pada ruang pengering lebih merata dibandingkan sebelum modifikasi. Setelah modifikasi, udara panas yang masuk ruang pengering cenderung mengalir ke rak II dan rak III. Maka syarat pertama telah terpenuhi yaitu pemerataan sebaran suhu. Akan tetapi, suhu di dalam ruang pengering setelah di modifikasi menjadi naik secara signifikan. Dimana kisaran suhu setiap rak 130 (I), 140 (II), 145 (III), dan 130 (IV)°C. Hal ini disebabkan karena suhu udara panas yang masuk ke HE tinggi (270-320°C). Perlu dilakukan modifikasi lanjutan agar suhu udara dalam ruang pengering mempunyai kisaran 75-90°C dengan cara menurunkan laju aliran udara yang masuk ke HE. Modifikasi yang dilakukan adalah dengan menambahkan *heat exchanger* penurun suhu yang diletakkan sebelum HE, maka suhu udara yang masuk ke HE akan turun (Gambar 6).

Menggunakan *heat exchanger* (HE') penurun suhu dikarenakan rancangan awal sistem pengeringan LEMIGAS menggunakan HE'. Penurunan suhu dilakukan dengan mengalirkan air dalam pipa-pipa untuk menurunkan suhu gas buan. Sebelum membuat HE', perlu ditentukan besarnya nilai suhu udara T yang masuk ke HE. Nilai suhu

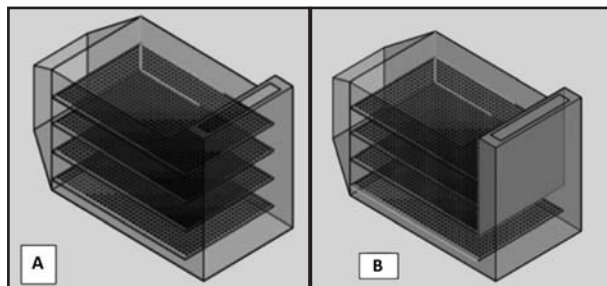
tersebut digunakan sebagai kebutuhan disain HE'. Besarnya suhu udara T yang keluar dari HE' dianalisis dengan analisis CFD dan pengukuran langsung.

Metode pengukuran langsung dengan menurunkan frekuensi kipas hisap dengan inverter, sehingga kecepatan kipas hisap berkurang. Dengan menurunkan kecepatan kipas hisap, maka suhu udara yang keluar dari boiler menurun. Pada dasarnya kecepatan kipas hisap tidak boleh diturunkan, karena bila diturunkan akan berpengaruh pada kinerja PLTU. Penurunan kipas hisap dilakukan hanya untuk kebutuhan penelitian agar mendapatkan suhu udara T.

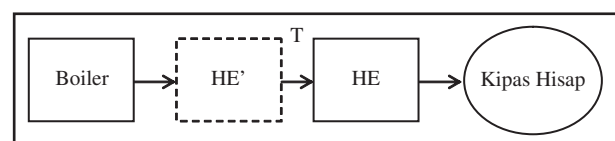
Frekuensi kipas awal 50 Hz diturunkan menjadi 25, 20, dan 15 Hz. Sehingga didapatkan nilai suhu udara T yang masuk ke dalam HE agar suhu dalam ruang berkisar (75-90°C). Sebaran suhu setiap rak dihitung dengan termokopel yang terhubung dengan *logger*. *Logger* akan mencatat perubahan suhu pada 10 termokopel setiap lima detik sekali selama 30 menit. Pengambilan data dilakukan dua kali kecuali pada frekuensi 50 Hz, dikarenakan sudah terlihat jelas perbedaan suhu setiap rak yang berbeda secara signifikan. Uji 1 termokopel diletakkan di tengah rak dan uji 2 termokopel ditaruh di pinggir rak. Data suhu dari pengujian pada Gambar 7.

Suhu pada bagian tengah rak relatif jauh lebih besar daripada pinggir rak. Dari data hasil pengukuran langsung, didapat pada frekuensi 20 Hz suhu dalam ruang pengering 75-90°C. Suhu rata-rata rak pada frekuensi 20 Hz adalah 84.5°C.

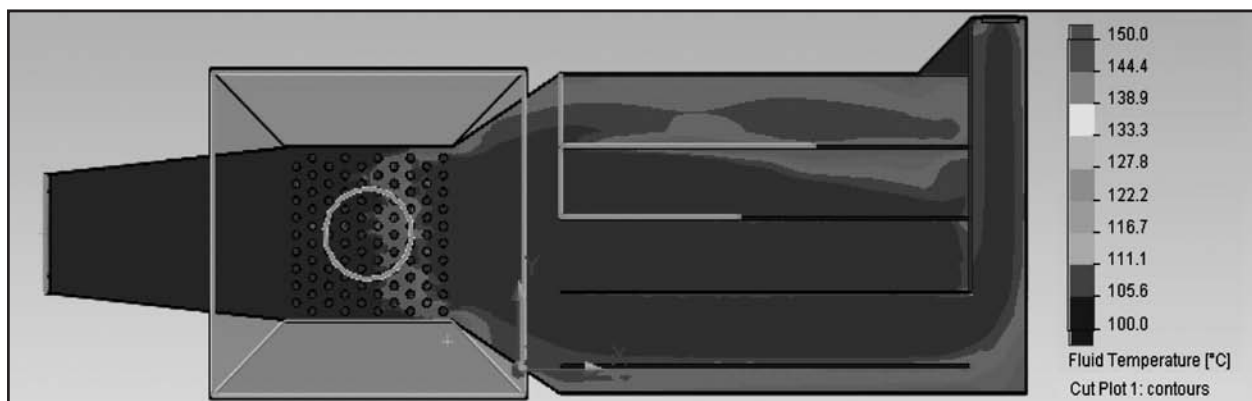
Analisis CFD dilakukan dengan memasukkan nilai suhu dan debit udara menuju HE ke dalam data input simulasi. Suhu udara yang dimasukkan adalah suhu rata-rata pembakaran biomassa 15 kg selama 30 menit yang diukur dengan termokopel sebelum masuk ke HE. Kecepatan udara dihitung



Gambar 4. (a) ruang pengering sebelum di modifikasi dan (b) sesudah modifikasi.



Gambar 6. Skema modifikasi penambahan *heat exchanger* penurun suhu.



Gambar 5. Hasil simulasi setelah modifikasi.

Tabel 1. Kecepatan udara panas yang keluar dari boiler

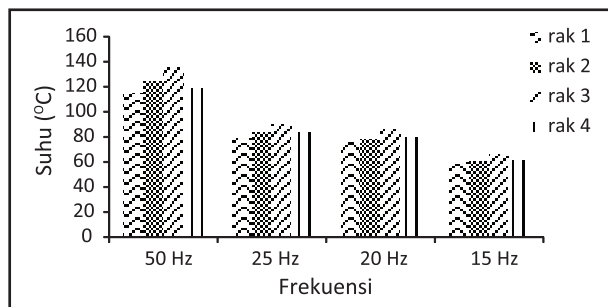
Frekuensi (Hz)	Kecepatan Udara di cerobong (m/s)	Suhu udara rata-rata keluar boiler (°C)	Luas penampang cerobong (m ²)	Debit udara (m ³ /s)
50	10	294.5	0.03	0.31
25	6	230.67	0.03	0.18
20	4.8	206.92	0.03	0.15
15	3.4	177.17	0.03	0.1

dengan anemometer. Debit udara tersaji pada Tabel 1.

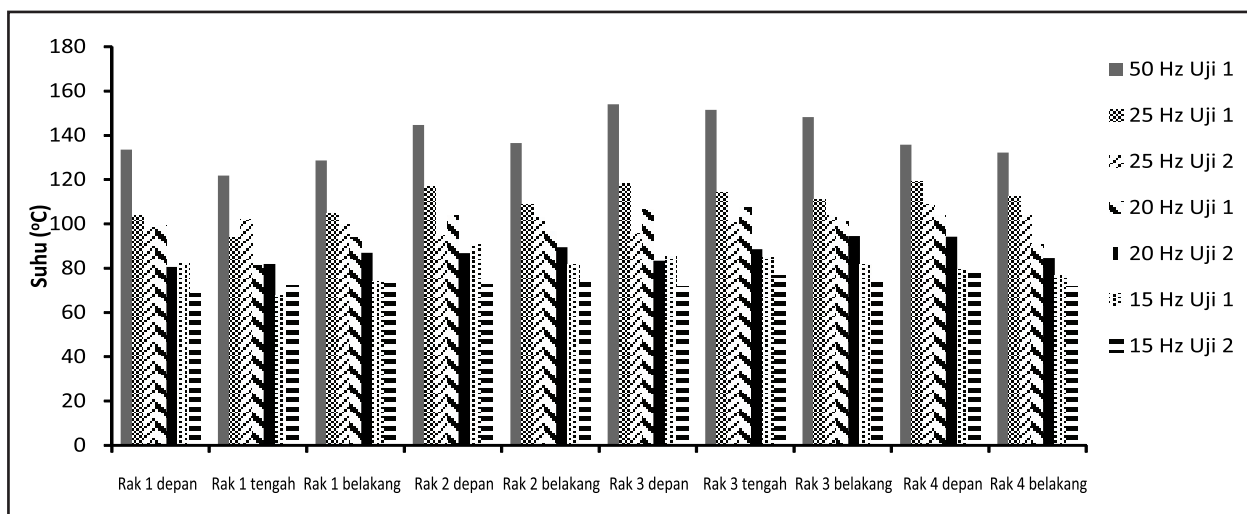
Penggunaan simulasi CFD berguna untuk melihat kontur sebaran suhu pada setiap rak. Selain itu CFD dapat mengetahui suhu maksimum, minimum, dan rata-rata setiap rak lebih baik dari pada pengukuran langsung. Suhu rata-rata rak pengering pada simulasi CFD sebanyak 122 titik. Gambar 8 menunjukkan suhu rata-rata setiap rak hasil simulasi CFD.

Dari data Gambar 8 menunjukkan bahwa pada frekuensi kipas hisap 25 Hz (230.67°C) dan 20 Hz (206.92°C) merupakan frekuensi yang menghasilkan suhu T yang diinginkan (75-90°C). Pada frekuensi 25 Hz (230.67°C), suhu rata-rata 4 rak sebesar 83.98±8.82°C, dengan suhu tertinggi pada rak III

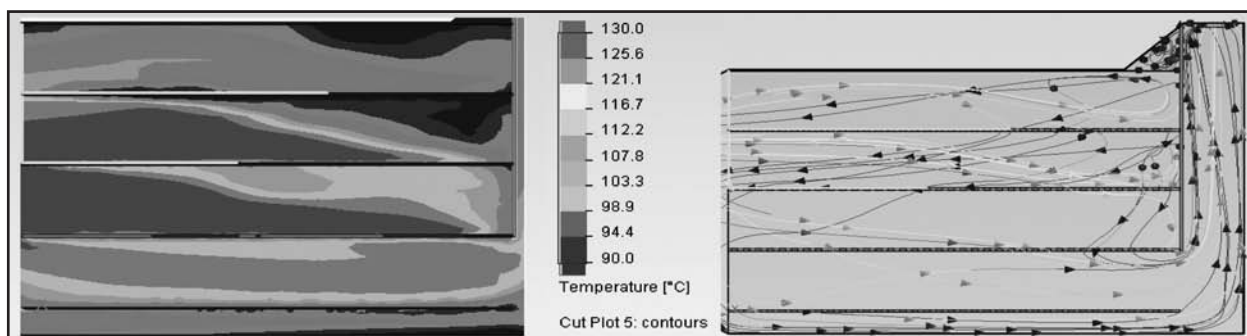
sebesar 89.72°C dan suhu terendah pada rak I sebesar 78.8°C. Pada frekuensi 20 Hz (206.92°C), suhu rata-rata 4 rak sebesar 79.78±4.38°C, dengan



Gambar 8. Suhu rata-rata simulasi CFD pada dari 122 titik setiap rak.



Gambar 7. Suhu 10 titik yang didapat dari pengukuran langsung.



Gambar 9. (A) Kontur suhu pada samping rak dan (B) vektor aliran udara tanpa dari samping rak pada frekuensi 25 Hz.

suhu rak tertinggi pada rak III sebesar 85.9°C (rak III) dan suhu terendah pada rak I sebesar 75.62°C. *Heat exchanger* penurunan suhu yang nantinya akan ditambahkan pada model sistem pengering dapat menurunkan suhu yang keluar dari boiler menjadi 230.67-206.92°C. Pada frekuensi 15 Hz, suhu rata-rata 4 rak 70.85°C.

Gambar 9 menunjukkan sebaran suhu pada samping rak dan arah vektor udara pada ruang pengering. Udara panas yang masuk ke ruang pengering cenderung bergerak ke rak II dan III. Suhu udara di depan rak relatif lebih tinggi dibandingkan di belakang rak. Udara akan dipantulkan dinding modifikasi sehingga udara panas lebih lama berada di ruang pengering.

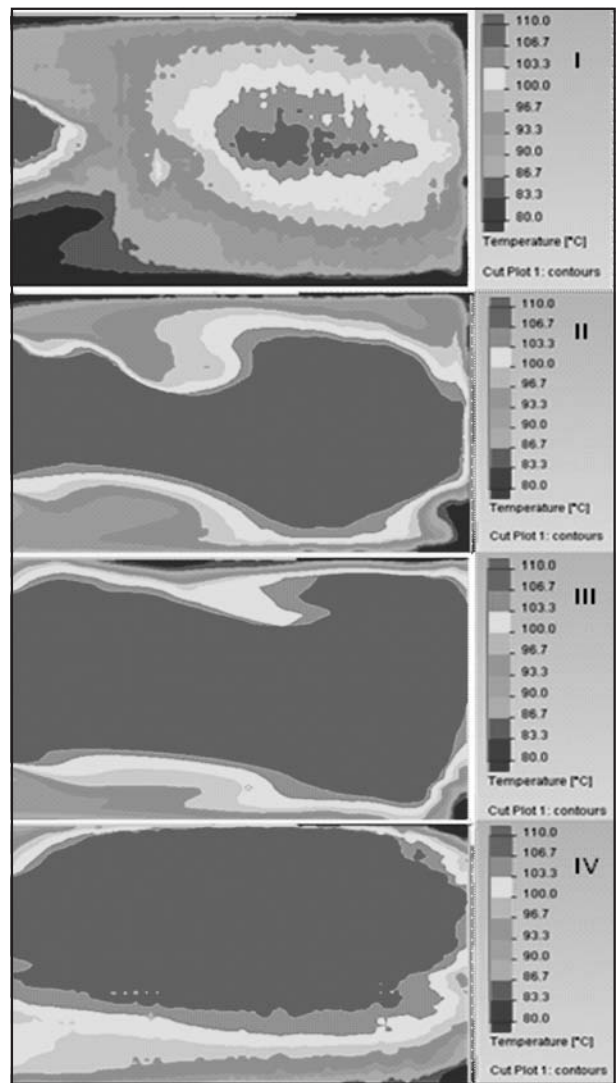
Sebaran suhu pada setiap rak pada frekuensi 25 Hz ditunjukkan pada Gambar 10. Kontur 2D sebaran suhu berada di 0.5 cm di atas rak. Sebaran suhu lebih seragam pada rak II, III, dan IV. Pada rak I, sebaran suhu tidak seragam.

Validasi hasil dari setiap frekuensi tersaji pada Gambar 11. Terdapat 20 titik data yang dibandingkan (10 titik pada tengah rak dan 10 titik pinggir rak) kecuali frekuensi 50 Hz hanya 10 titik.

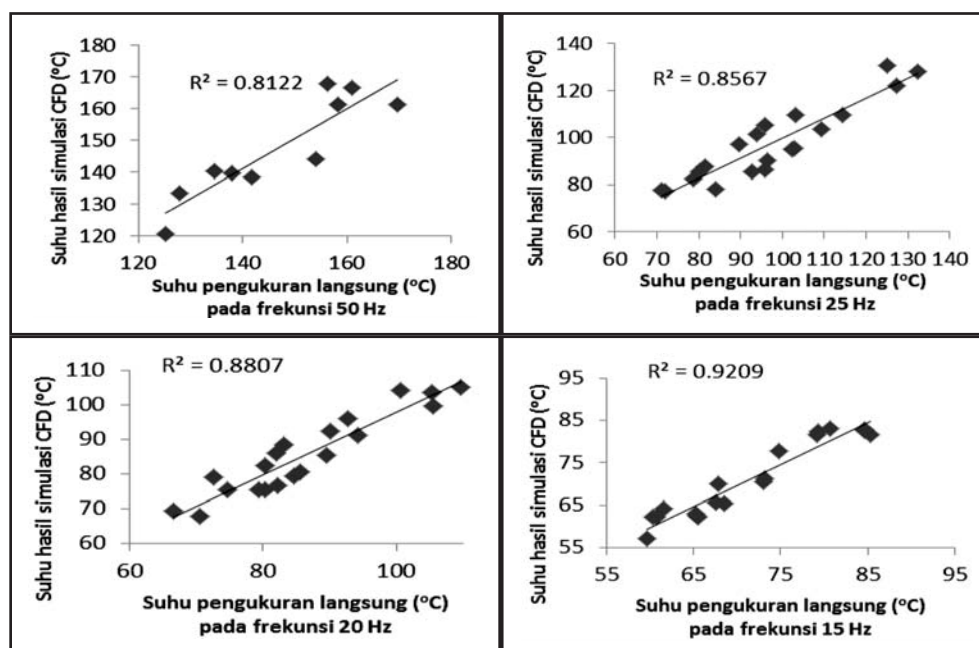
Semakin besar frekuensi maka nilai koefisien determinasi semakin kecil. Semua nilai koefisien determinasi (R^2) diatas 0.8. Sehingga dapat dikatakan hasil simulasi CFD baik untuk prediksi kondisi yang sebenarnya.

Nilai validasi bergantung pada :

1. Getaran yang terjadi pada ruang pengering, semakin tinggi frekuensi kipas hisap maka getaran dalam ruang pengering semakin besar. Sehingga posisi termokopel ikut bergetar
2. Suhu udara keluar boiler, pada pengukuran langsung berubah-ubah sedangkan pada simulasi CFD tetap.



Gambar 10. Kontur suhu pada setiap rak pada frekuensi 25 Hz.



Gambar 11. Validasi hasil pengukuran dengan hasil simulasi CFD.

Simpulan

Sebaran suhu dan arah vektor udara pada ruang pengering dapat diketahui dalam bentuk kontur dengan menggunakan CFD. Penambahan dinding untuk menghambat laju udara panas mampu menyebarkan suhu ke setiap rak pengering. Akan tetapi, suhu rata-rata dalam ruang pengering menjadi semakin besar. Udara panas yang masuk yang masuk ke ruang pengering cenderung ke rak II dan III.

Penurunan suhu dalam ruang pengering (agar suhu dalam ruang pengering 75-90°C) dengan menambahkan *heat exchanger* penurunan suhu yang diletakkan sebelum *heat exchanger* awal. *Heat exchanger* penurunan suhu akan menurunkan suhu udara panas yang keluar dari boiler 270-320°C menjadi 206.92-230.67°C.

Dari gambar kontur 2-D dapat diketahui udara panas yang masuk ke ruang pengering cenderung mengalir ke rak II dan rak III. Sebaran suhu lebih merata pada rak II, III, dan IV. Sifat pengering tipe rak yang statis (tidak bergerak) mempersulit meratakan suhu setiap raknya. Selain itu, bentuk geometri dari ruang pengering merupakan faktor utama untuk menratakan suhu udrara di dalamnya. Posisi rak yang dekat dengan sumber panas akan menerima panas lebih besar dibandingkan posisi rak yang dekat dengan outlet ruang pengering.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan, Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi (P3TKEBTKE) LEMIGAS yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian model pengering tipe rak di laboratorium boiler. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada Bapak Paber dan Bapak Dedi sebagai pembimbing lapang serta Bapak Y. Aris Purwanto dan Ibu Dyah Wulandani sebagai pembimbing tesis.

Daftar Pustaka

- Guarte, R.C., W. Mühlbauer, M. Kellert. 1996. Drying characteristics of copra and quality of copra and coconut oil. *Postharvest Biology and Technology* Vol. 9(3): 361-372.
- Mathioulakis, E., V.T. Karathanos, V.G. Belessiotis. 1998. Simulation of air movement in a dryer by computational fluid dynamics: application for the drying of fruits. *Journal of Food Engineering* Vol. 36(2): 183-200.
- Mirade, P.S., J.D. Daudin. 2000. A numerical study of the airflow patterns in a sausage dryer. *Drying Technology* Vol. 18(1-2): 81-97.
- Misha, S., M. Sohif, H.R. Mohd, S. Kamaruzzaman, Elias S. 2013. The Prediction of Drying Uniformity in Tray Dryer System using CFD Simulation. *International Journal of Machine Learning and Computing* Vol. 3(5): 419-423
- Mohanraj, M., P. Chandrasekar. 2008. Drying of copra in a forced convection solar drier. *Biosystems Engineering* Vol. 99(4): 604-607.
- Niamnuy, C., S. Devahastin. 2005. Drying kinetics and quality of coconut dried in a fluidized bed dryer. *Journal of food engineering* Vol. 66: 267-271.
- Puji, W., W. Dyah, Y. Aris P. 2009. Kajian sebaran aliran udara panas pada model pengering efek rumah kaca hibrid tipe rak berputar menggunakan Computational Fluid Dynamic (CFD). *Jurnal Enjineri Pertanian*. Vol. 8(2): 105-115
- Sayful, M., Hargono. 2009. Profil suhu pada proses pengeringan produk pertanian dengan simulasi computational Fluid dynamics (CFD). *Reaktor* Vol. 12(3): 195-202.
- Shaw, C.T. 1992. *Using Computational Fluid Dynamics*. Prentice Hall. New Jersey. SA.
- Tzempelikos, D.A., A.P. Vouras, A.V. Bardakas, A.E. Filios, D.P. Margaritis. 2012. Analysis of air velocity distribution in a laboratory batch-type tray air dryer by computational fluid dynamics. *International journal of mathematics and computers in simulation* Vol. 5(6): 413-421.
- Versteeg, H.K., W. Malalasekera. 1995. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method*. Longman Sc & Technical. Malaysia.
- Xia, B., D.W. Sun. 2002. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*. Vol. 34(1): 5-24.